

Viktor KANICKÝ¹, Petr HRADIL², Jiří KALA³, Vlastislav SALAJKA⁴

COMPARATIVE ANALYSIS OF SEISMIC RESPONSES OF STRUCTURES TO MINING
INDUCED SEISMIC EVENT

SROVNÁVACÍ VÝPOČTY SEIZMICKÝCH ODEZEV TYPICKÝCH KONSTRUKCÍ NA DŮLNÍ
SEIZMICITU

Abstract

Comparative analysis of seismic responses of selected structures to the typical mining induced seismic event formulated for an important mining area has been carried out. The group of structures has included twelve-storey panel building, four-storey dwelling house, five-storey reinforced concrete production shop, reinforced concrete stack and reinforced concrete cooling tower. Sophisticated FEM models of structures have been developed. The responses of structures have been computed using both base acceleration time histories and corresponding response spectra. Selected features of seismic responses have been compared.

Key words: seismic responses of structures, mining induced seismicity, Karviná region

Úvod

Jedním z cílů prací v rámci grantového projektu GAČR 105/04/1424 „Odezva technologických konstrukcí a staveb na zatížení technickou seizmicitou“ bylo prozkoumat experimentálně a numerickými výpočty dynamické chování vybraných typických stavebních konstrukcí vystavených nestacionárnímu dynamickému zatížení technickou, speciálně pak indukovanou seizmicitou. Výpočty měly být založeny na datech o seizmických pohybech podloží určených měřeními s využitím specifického zdroje technické seizmicity indukované důlní činností v oblasti kolem Karviné.

V rámci přípravy řešení seizmických odezvy modelů vybraných konstrukcí, v období před zadáním vybraného záznamu měřeného časového průběhu rychlosti seizmického pohybu základu pro oblast Karviné, byly provedeny výpočty odezvy těchto konstrukcí s použitím návrhových základových akceleroogramů, resp. návrhových spekter odezvy, získaných při seizmické analýze realizovaných konstrukcí v předchozím období. Cílem bylo porovnání výsledků řešení odezvy navzájem i s výpočty jiných pracovišť.

Podrobná analýza byla provedena např. pro železobetonovou halu (rámovou technologickou nosnou konstrukci – model č. 3) realizovanou v hliníkárně Jajarm (Irán). Zde byly porovnávány výsledky řešení odezvy s použitím podkladových akceleroogramů i spekter odezvy získaných ze záznamů při zemětřeseních Naghan a Tabas na dvou různých pracovištích. Odezvy stanovené s použitím spekter odezvy byly dále porovnávány s odezvami, získanými aplikací spekter vytvořených dle zásad UBC 1997, IBC 2003 a EC8. Získané poznatky byly využity při další práci v rámci grantového projektu.

Významným dílím úkolem projektu bylo vytvoření věrohodných výpočtových modelů vybraných stavebních konstrukcí včetně podloží s použitím metody konečných prvků a jejich ověření alternativními výpočty seizmické odezvy. Předpokládala se aplikace výpočtového modelu typického

¹ Doc. Ing., CSc., Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, Brno, kanicky.v@fea.cz

² Ing., Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno, hradil.p@fce.vutbr.cz

³ Ing., Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno, kala.j@fce.vutbr.cz

⁴ Doc. Ing., CSc., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno, salajka.v@fce.vutbr.cz

seizmického pohybu podloží pro oblast Karviná ve formě buď typického základového akceleroqramu nebo odtud odvozeného obalového spektra odezvy.

Z obecného zadání problému vyplynuly následující dílčí úlohy:

- ☐ výběr sledovaných typických konstrukcí
- ☐ vytvoření výpočtových modelů vybraných konstrukcí
- ☐ výpočty odezev modelů na zadané seizmické buzení
- ☐ návrh optimálního postupu výpočtu odezvy typické konstrukce
- ☐ zobecnění poznatků z realizovaného programu výpočtů

Soubor uvedených úkolů lze chápat jako jeden relativně uzavřený dílčí úkol pracoviště Ústavu stavební mechaniky, Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně v rámci projektu.

Postup řešení dílčího úkolu

Na základě předběžných informativních výpočtů bylo vybráno pět reprezentativních stavebních objektů, jejichž seizmická odezva byla analyzována numerickým výpočtem. Jde o následující stavební konstrukce:

- 1) Vícepodlažní obytný dům s aplikací velkoplošných panelů.
- 2) Běžný klasický zděný bytový dům.
- 3) Železobetonová rámová technologická nosná konstrukce.
- 4) Železobetonový vysoký komín pro odvod spalín.
- 5) Železobetonová chladicí věž.

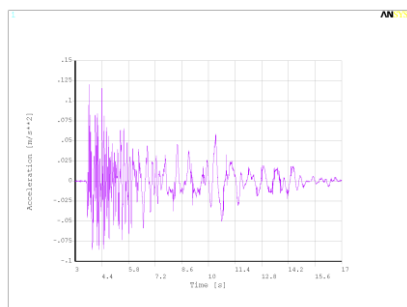
Při výběru sledovaných konstrukcí se přihlíželo k tomu, aby každá z nich reprezentovala typickou konstrukci, charakterizovanou účelem stavby, konstrukční strukturou a použitými konstrukčními materiály. Dbalo se na to, aby konstrukce zahrnovaly vybrané typické varianty založení stavby. Výběr respektoval požadavek, aby řešení seizmické odezvy zahrnovalo typické případy praktických úloh – od jednoduchých úloh prosté predikce maximální odezvy v přemístěních a napětích až po konstrukci podlažních spekter odezvy pro následné posouzení seizmické odolnosti instalovaného technologického zařízení. Při výběru typických konstrukcí se přihlíželo k tomu, aby seizmické zatížení mohlo být modelováno (bez časových problémů výpočtů odezvy) jak s použitím základových akceleroqramů, tak s použitím odpovídajících spekter odezvy. Do výběru typických konstrukcí pro analýzu byly zařazeny výhradně stavby realizované buď ve sledované oblasti seismicity Karviná, nebo konstrukce podrobně seizmicky analyzované a následně realizované v jakékoli seizmicky aktivní oblasti (Kárník et al., 1957; Procházková et al., 1999).

Výpočtové modely vybraných konstrukcí vystihující na dvou volených úrovních seizmickou interakci s podložím byly vytvořeny v prostředí programového systému ANSYS. Byly ověřeny postupy korektního modelování vybraných konstrukcí pro seizmickou analýzu. Podrobně bylo analyzováno modelování podloží se zřetelem k tuhosti, hmotnosti a tlumení.

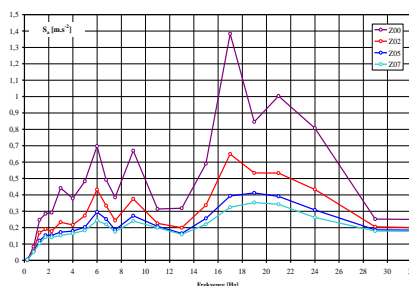
Se zřetelem na možnost srovnávání výsledků vzorových výpočtů odezev typických konstrukcí byl výpočtový model seizmického pohybu podloží odvozen od souboru reálných seizmologických dat registrovaných v oblasti Karviná (viz Klíma et al., 1986; Kaláb & Knejzlík, 2001; Kaláb & Knejzlík, 2002). Data byla předána Ústavem geoniky AV ČR jako měřené časové průběhy absolutních rychlostí kmitání volného zemského povrchu ve třech ortogonálních směrech. Tento záznam byl smluvně označen jako záznam „důlně indukovaného jevu z 11. 03. 2004“ (viz Kaláb, 2004; Kaláb et al., 2006).

Předběžné výpočty prokázaly vesměs velmi slabé odezvy objektů při zadaném seizmickém pohybu. Protože řada dalších měření (viz Klíma et al., 1986; Kaláb & Knejzlík, 2001; Kaláb &

Knejzlík, 2002) prokázala výskyt jevů z podstatně vyšší intenzitou, bylo rozhodnuto o odvození „typického“ seizmického pohybu pro účely výpočtů prováděných v rámci grantového projektu šestinásobkem daného pohybu. Z daných časových průběhů rychlostí byly integrováním stanoveny průběhy posunutí a derivováním byly získány „typické“ akcelerogramy (obr. 1). Dále byla vygenerována spektra odezvy ve zrychlení. Vyhlazené spektrum odezvy je označováno jako „typické“ (obr. 2). Výpočty seizmické odezvy vybraných konstrukcí byly provedeny pro oba modely seizmického pohybu bloku podloží. Charakteristiky odezvy byly vzájemně porovnány.



Obr.1 Akcelerogram – směr z
– časová oblast 3 až 17 s.



Obr.2 Vyhlazené spektrum absolutního
zrychlení – směr z.

Srovnávací výpočty seizmických odezvy typických konstrukcí

Seizmické analýzy vybraných konstrukcí byly provedeny vždy s použitím dvou variant výpočtových modelů konstrukce lišících se modelováním podloží (tuhé nebo poddajné podloží). Dle doporučení ÚGN byly ve výpočtech použity parametry podzákladí typické pro oblast Karvinska a charakterizované rychlostí šíření podélných vln 107 m.s^{-1} a smykových vln $48,5 \text{ m.s}^{-1}$. Objemová hmotnost je 1850 kg.m^{-3} . Řešila se odezva na seizmický pohyb podloží odpovídající typickému „dülně indukovanému seizmickému jevu“. Výpočty seizmické odezvy každé z vybraných konstrukcí byly provedeny vždy pro dva modely seizmického pohybu bloku podloží popsaného pro jeho hranice („typické“ podkladové akcelerogramy a „typická“ spektra odezvy). V případě popisu seizmického pohybu podloží typickými podkladovými akcelerogramy se odezva řeší integrováním pohybových rovnic výpočtového modelu. Pro zvolený uzel modelu v jisté výškové úrovni lze stanovit časový průběh složky jeho posunutí a odtud lze snadno určit příslušné spektrum odezvy ve zrychlení (tzv. složkové podlažní spektrum odezvy). Pro konkrétní úlohu se podlažní spektrum odezvy odvozuje ze souboru spekter odezvy stanovených pro soubor uzlů ve zvolené úrovni. Pro každou z vybraných konstrukcí byla stanovena podlažní spektra odezvy ve zvolených výškových úrovních.

Dvanáctipodlažní obytný dům s aplikací velkoplošných panelů

Úvodní informace

První z vybraných konstrukcí je dvanáctipodlažní bytový dům jako reprezentant stavby z velkoplošných panelů s třídou odolnosti C (dle ČSN 73 0031) a s třídou významu II (dle ČSN 73 0040). Aplikace konstrukcí tohoto typu byla velmi rozšířená a jejich počet je značný, rovněž v částech území, které jsou oblastmi zájmu řešení úkolu. Technická životnost většiny panelových domů není zdaleka vyčerpána a jsou připravovány rekonstrukce s cílem prodloužit podstatně jejich použitelnost i při současných a budoucích zvýšených nárocích na bydlení. Přes značný počet těchto konstrukcí je jejich variabilita svým způsobem omezená.

Vybraný panelový dům typu OP 1 o půdorysných rozměrech 23,25 m, (délka) a 19,05 m (šířka). Výška budovy je 40,49 m. Struktura konstrukce je prostorově složitě členěná, s množstvím stěnových otvorů a podlažních výřezů, ale vnitřní členění podlaží je relativně pravidelné. Přídavná

(užitná) hmotnost na podlaží může být v širokých mezích. Budova je podsklepená, se základovou deskou. Pro účely analýzy se uvažují výše uvedené standardní vlastnosti základové půdy u objektu.

Výpočtový model panelového domu

Výpočtový model panelového domu byl vytvořen s použitím stěnodeskových prvků SHELL43 a pomocných prvků SURF154. Geometrie modelu odpovídá i v podrobnostech dosažitelné výkresové dokumentaci objektu. Modelování respektovalo všechny stěnové otvory, podlažní výřezy, vnitřní členění podlaží, podsklepení a základy. Hodnoty fyzikálních veličin konstrukčních materiálů byly převzaty z věrohodných zdrojů. Odpovídající prostorové rozložení hmotnosti konstrukce (včetně modelovaných nenosných částí) je zajištěno zavedením výpočtových hodnot objemové hmotnosti prvků modelu. U modelu byla uvažována užitná hmotnost na podlaží 50 kg.m^{-2} . Rozptyl mechanické energie kmitání konstrukce je modelován v souladu s empirií konstantní hodnotou modálního poměrného útlumu 5 %. Oprávněně lze očekávat, že model korektně postihne základní dynamické vlastnosti vlastní konstrukce budovy.

Tab.1 Počty prvků, uzlů a stupňů jednotlivých výpočtových modelů.

Typ objektu	Typ modelu	Počet prvků	Počet uzlů	Počet stupňů volnosti
Dvanáctipodlažní obytný dům s aplikací velkoplošných panelů	A	59798	39822	234039
	B	74725	56544	279597
Běžný klasický zděný čtyřpodlažní bytový dům	A	11382	6126	34363
	B	20298	16211	64213
Železobetonová hala (rámová technologická nosná konstrukce)	A	1534	1091	6039
	B	7150	7412	22266
Železobetonový vysoký komín pro odvod spalín	A	90352	103733	306936
	B	133513	117628	397402
Železobetonová chladicí věž	A	19536	11040	64944
	B	45392	38599	146284

Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitů konstrukce

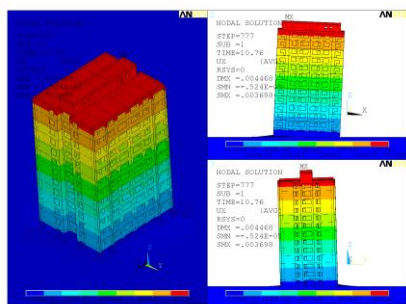
Po provedení statické odezvy bylo v dalším kroku vyčísleno 1000 vlastních frekvence a vlastních tvarů kmitů obou variant výpočtových modelů konstrukce. Výpočet byl proveden Lanczosovou metodou a je první fází při výpočtu odezvy při užití metody lineárních spekter odezvy.

Základní vlastní frekvence stanovená pro výpočtový model A je $f_1 = 3,906 \text{ Hz}$, hodnota $f_2 = 4,328 \text{ Hz}$. U výpočtového modelu B je $f_1 = 0,7545 \text{ Hz}$ a hodnota $f_2 = 0,8397 \text{ Hz}$.

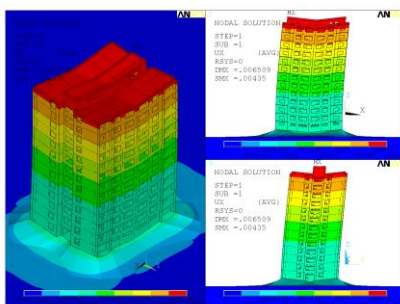
Seizmická odezva konstrukce

Odezva konstrukce na seizmický pohyb podloží popsaný typickými podkladovými akcelerogramy $a_{sx}(t)$, $a_{sy}(t)$, $a_{sz}(t)$ byla řešena pro časovou oblast 14 s přímou integrací pohybových rovnic. Byly získány pole posunutí, deformací a napětí v 1400 časových krocích (viz obr. 3). V konečné fázi výpočtu byly vyčísleny obálky maxim a minim všech veličin.

Výpočet odezvy konstrukce na seizmický pohyb podloží popsaný typickými spektry odezvy $S_{ax}(f)$, $S_{ay}(f)$, $S_{az}(f)$ zohlednil všechny významné tvary kmitu. Výsledné hodnoty odezvy byly získány podle kombinací podle pravidla CQC (Complete Quadratic Combination Metod). Ukázka pole posunutí je na obr. 4.



Obr.3 Posunutí u_x v čase 10,76 s.



Obr.4 Posunutí u_x – řešení spektry odezvy.

Tab.2 Výsledky – výpočtový model B.

Posunutí	Seizmická odezva na buzení akcelerogramy		Seizmická odezva na buzení spektry odezvy
	Maximum odezvy [m]	Minimum odezvy [m]	Maximum odezvy pom. útlum 5% [m]
u_x	+0,003698	-0,003328	0,004350
u_y	+0,003475	-0,003642	0,004373
u_z	+0,002038	-0,001683	0,003044

Studie vlivu užitných hmotností na podlažích

Význam studie vyplývá ze skutečnosti, že užitné hmotnosti na podlažích ovlivňují odezvu konstrukce. Představují prvek nejistoty ve výpočtu, poněvadž jejich skutečné hodnoty ani v konkrétních případech nelze věrohodně stanovit. Posouzení citlivosti vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů na změny hodnot užitných hmotností je proto vhodné. Na základě provedené studie lze konstatovat, že vliv užitných hmotností v běžných mezích na podlažích obytného domu není podstatný.

Studie vlivu tuhosti základové půdy

Význam studie vyplývá ze skutečnosti, že tuhost základové půdy ovlivňuje odezvu konstrukce. Představuje významný prvek nejistoty ve výpočtu, poněvadž dosud není k dispozici jednoznačné přiřazení běžně užívaných parametrů půdy k tuhostem pro řešení dynamiky konstrukcí. Skutečné hodnoty tuhostí pro účely dynamiky se i v konkrétních případech stanovují velmi obtížně. Posouzení citlivosti vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů na změny hodnot tuhosti základové půdy je proto nutné. Na základě provedené studie lze konstatovat, že vliv tuhosti základové půdy na vlastní frekvence a tvary kmitů je zásadní.

Běžný klasický zděný čtyřpodlažní bytový dům

Úvodní informace

Druhá z vybraných konstrukcí je běžný klasický zděný čtyřpodlažní bytový dům jako reprezentant stavby s třídou odolnosti B a s třídou významu III. Aplikace cihlových konstrukcí tohoto typu byla v polovině minulého století velmi rozšířená. Půdorysné rozměry jsou 15,3 m, (délka) a 9,0 m (šířka). Výška domu je 13,4 m. Struktura konstrukce je prostorově jednoduše členěná, stěnové otvory jsou opatřeny betonovými překlady, členění podlaží je pravidelné. Stropy jsou v přední části domu provedeny s dřevěnými trámy, v zadní části domu jsou žebrované železobetonové stropní

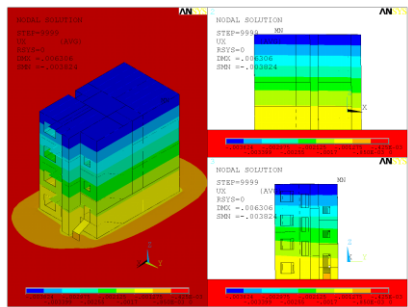
desky. Přídavná (užitná) hmotnost na podlaží může být v širokých mezích. Budova není podsklepená, má jednoduchou základovou desku. Pro účely analýzy se uvažují výše uvedené standardní vlastnosti základové půdy.

Výpočtový model domu

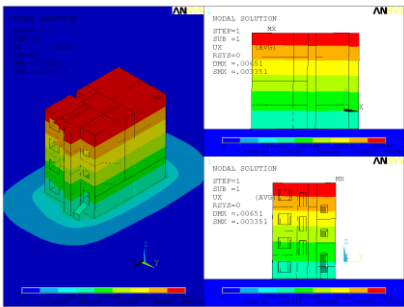
Geometrie modelu odpovídá i v podrobnostech výkresové dokumentaci objektu. Modelování respektovalo všechny stěnové otvory, podlažní výřezy a vnitřní členění podlaží a skladby stropů. Konstrukce je modelována s použitím prvků typu SHELL43, BEAM44 a pomocnými prvky SURF154. Hodnoty fyzikálních veličin konstrukčních materiálů byly převzaty z věrohodných zdrojů. Odpovídající prostorové rozložení hmotnosti konstrukce (je zajištěno zavedením výpočtových hodnot objemové hmotnosti prvků modelu. U modelu byla uvažována užitná hmotnost na podlaží 50 kg.m^{-2} . Rozptyl mechanické energie kmitání konstrukce je modelován hodnotou modálního poměrného útlumu 7 %. Oprávněně lze očekávat, že model korektně postihne základní dynamické vlastnosti vlastní konstrukce budovy.

Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitů konstrukce

Výpočet s použitím Lanczosovy metody bylo pro variantu modelu A stanoven 1000 (pro variantu B 150) vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů. Základní vlastní frekvence stanovená pro výpočtový model A je $f_1 = 5,109 \text{ Hz}$, hodnota $f_2 = 6,417 \text{ Hz}$. U výpočtového modelu B je $f_1 = 1,500 \text{ Hz}$ a $f_2 = 1,846 \text{ Hz}$.



Obr.5 Obálka minim polí posunutí u_x .



Obr.6 Posunutí u_x – řešení spektry odezvy.

Seizmická odezva konstrukce

Odezva konstrukce na seismický pohyb podloží popsáný typickými podkladovými akcelerogramy $a_g(t)$ byla stanovena přímou integrací pohybových rovnic. Pro soubor 1400 volených časových kroků byla získána pole posunutí (viz obr. 5) a napětí. V konečné fázi byly stanoveny obálky extrémů odezвовých veličin. Při výpočtu polí extrémů odezвовých veličin s použitím spekter odezvy $S_d(f)$ (viz obr. 6) bylo pro kombinaci modálních odezev použito pravidlo CQC.

Tab.3 Výsledky – výpočtový model B.

Posunutí	Seizmická odezva na buzení akcelerogramy	Seizmická odezva na buzení spektry odezvy
----------	--	---

	Maximum odezvy [m]	Minimum odezvy [m]	Maximum odezvy pom. útlum 7% [m]
u_x	+0,003369	-0,003824	0,003351
u_y	+0,004978	-0,004194	0,004833
u_z	+0,002794	-0,002858	0,002928

Železobetonová hala (rámová technologická nosná konstrukce)

Úvodní informace

Třetí z vybraných konstrukcí je pětipodlažní železobetonová hala velmi důležitého provozního souboru technologické linky. Jde o stavbu s třídou odolnosti B a s třídou významu I. V podstatě jde o železobetonovou technologickou nosnou konstrukci vytvořenou jako prostorový rám se stropními deskami. Na stropních deskách jsou kotveny četné jednotky výrobního zařízení. Jisté jednotky výrobního zařízení je nutno se zřetelem na jejich hmotnost a tuhost uložení uvažovat jako integrované s nosnou konstrukcí. Jde zejména o sila umístěná na pátém podlaží. Půdorysné rozměry haly jsou 24 m (délka) a 24 m (šířka), výška haly je 18,63 m. Hala není podsklepená, má masivní základovou desku. Pro účely analýzy se uvažují výše uvedené standardní vlastnosti základové půdy.

Výpočtový model haly

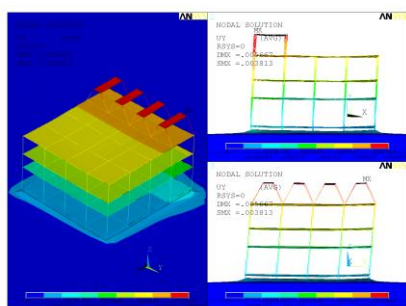
Geometrie modelu odpovídá i v podrobnostech výkresové dokumentaci objektu Konstrukce je převážně modelována s použitím deskostěnových prvků typu SHELL63 a nosníkůvých prvků typu BEAM4. Blok pružného podlaží je modelován prostorovými prvky typu SOLID45. Hodnoty fyzikálních veličin konstrukčních materiálů byly převzaty z věrohodných zdrojů. Odpovídající prostorové rozložení hmotnosti konstrukce (včetně instalovaného zařízení) je zajištěno zavedením výpočtových hodnot objemové hmotnosti prvků modelu. U modelu byla uvažována proměnná užitná hmotnost na podlažích podle rozmístění technologie v rozmezí od 16 do 960 kg.m². Rozptyl mechanické energie kmitání konstrukce je modelován v souladu s empirií konstantní hodnotou modálního poměrného útlumu 5 %. Oprávněně lze očekávat, že model korektně postihne základní dynamické vlastnosti vlastní konstrukce budovy.

Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitů konstrukce

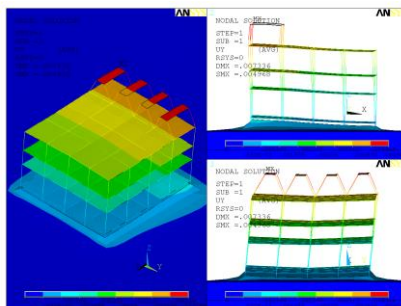
Výpočet s použitím Lanczosovy metody bylo pro variantu modelu A stanoveno 1000 (pro variantu B 200) vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů. Základní vlastní frekvence stanovená pro výpočtový model A je $f_1 = 1,564$ Hz, hodnota $f_2 = 1,658$ Hz. U výpočtového modelu B je $f_1 = 1,022$ Hz a $f_2 = 1,052$ Hz.

Seizmická odezva konstrukce

Odezva konstrukce na seizmický pohyb podlaží popsaný typickými podkladovými akcelerogramy $a_g(t)$ byla stanovena přímou integrací pohybových rovnic. Pro soubor 1400 volených časových kroků byla získána pole posunutí a napětí. V konečné fázi byly stanoveny obálky extrémů odezvoových veličin (viz obr. 7). Při výpočtu polí extrémů odezvoových veličin s použitím spekter odezvy $S_d(f)$ (viz obr. 8) bylo pro kombinaci modálních odezev použito pravidlo CQC.



Obr.7 Obálka minim polí posunutí u_y .



Obr.8 Posunutí u_y – řešení spektry odezvy.

Tab.4 Výsledky – výpočtový model B.

Posunutí	Seismická odezva na buzení akcelerogramy		Seismická odezva na buzení spektry odezvy
	Maximum odezvy [m]	Minimum odezvy [m]	Maximum odezvy pom. útlum 5% [m]
u_x	+0,003778	-0,003686	0,002551
u_y	+0,003813	-0,004018	0,004968
u_z	+0,001882	-0,002964	0,004945

Železobetonový vysoký komín pro odvod spalin

Úvodní informace

Čtvrtou z vybraných konstrukcí je železobetonový, 269 m vysoký komín pro odvod spalin. Jde o stavbu s třídou odolnosti B a s třídou významu II. Komín je proveden až do výšky 90 m jako dvouplášťový. Vnější železobetonový plášť je kuželový, vnější průměr u paty komína je 24,1 m, vnitřní průměr 22,7 m. Vnější průměr na vrcholu je 8,98 m, vnitřní průměr 8,58 m. Vnitřní skořepina je válcová, vnější průměr u paty komína je 14,6 m, vnitřní průměr 13,76 m. Do výšky 70 m je železobetonová, pak pokračuje zdivo. Základ komínu je pilotový, železobetonová základová deska má poměrně malý průměr. Pro účely analýzy se uvažují výše uvedené standardní vlastnosti základové půdy.

Výpočtový model komína

Geometrie modelu odpovídá i v podrobnostech výkresové dokumentaci objektu. Konstrukce komína, základová deska a blok pružného podloží se modeluje prostorovými prvky typu SOLID45. Hodnoty fyzikálních veličin konstrukčních materiálů byly převzaty z věrohodných zdrojů. Odpovídající prostorové rozložení hmotnosti konstrukce je zajištěno zavedením výpočtových hodnot objemové hmotnosti prvků modelu. Rozptyl mechanické energie kmitání konstrukce je modelován v souladu s empirií konstantní hodnotou modálního poměrného útlumu 5 %. Oprávněně lze očekávat, že model korektně postihne základní dynamické vlastnosti vlastní konstrukce.

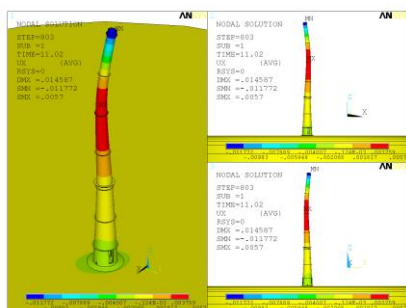
Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitů konstrukce

Výpočet s použitím Lanczosovy metody bylo pro variantu modelu A stanoven 1000 (pro variantu B 1000) vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů. Základní vlastní frekvence stanovená

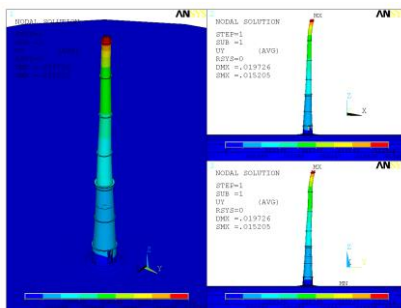
pro výpočtový model A je $f_1 = 0,2309$ Hz, hodnota $f_2 = 0,2330$ Hz. U výpočtového modelu B je $f_1 = 0,2000$ Hz a $f_2 = 0,2015$ Hz.

Seizmická odezva konstrukce

Odezva konstrukce na seizmický pohyb podloží popsaný typickými podkladovými akcelerogramy $a_g(t)$ byla stanovena přímou integrací pohybových rovnic. Pro soubor 1400 volených časových kroků byla získána pole posunutí (viz obr. 9) a napětí. V konečné fázi byly stanoveny obálky extrémů odezвовých veličin. Při výpočtu polí extrémů odezвовých veličin s použitím spekter odezvy $S_a(f)$ (viz obr. 10) bylo pro kombinaci modálních odezв použito pravidlo CQC.



Obr.9 Posunutí u_x v čase 11,02 s.



Obr.10 Posunutí u_x – řešení spektry odezvy.

Tab. 5 Výsledky – výpočtový model B.

Posunutí	Seizmická odezva na buzení akcelerogramy		Seizmická odezva na buzení spektry odezvy
	Maximum odezvy [m]	Minimum odezvy [m]	Maximum odezvy pom. útlum 5% [m]
u_x	+0,007883	-0,011772	0,012278
u_y	+0,016075	-0,012488	0,015205
u_z	+0,002893	-0,002602	0,003197

Železobetonová chladicí věž

Úvodní informace

Pátou z vybraných konstrukcí je železobetonová chladicí věž elektrárny Tušimice II. Jde o stavbu s třídou odolnosti B a s třídou významu II. Chladicí věž je typu Ittersen, vysoká 96 m. Nosná konstrukce věže se skládá ze základové konstrukce ve tvaru kruhového prstence, systému šikmých prefabrikovaných stоек a pláště ve tvaru hyperboloidu s tloušťkou měnící se od 500 mm na 130 mm.

Výpočtový model chladicí věže

Geometrie modelu odpovídá i v podrobnostech výkresové dokumentaci objektu. Základová konstrukce je převážně modelována skořepinovými prvky typu SHELL43, stojky se modelují s použitím prutových prvků typu BEAM44 a u pláště jsou použity prvky SHELL63. Blok pružného podloží se modeluje prostorovými prvky typu SOLID45. Hodnoty fyzikálních veličin konstrukčních materiálů byly převzaty z věrohodných zdrojů. Odpovídající prostorové rozložení hmotnosti konstrukce je zajištěno zavedením výpočtových hodnot objemové hmotnosti prvků modelu. Rozptyl

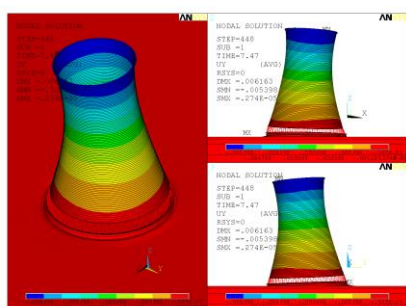
mechanické energie kmitání konstrukce je modelován v souladu s empirií konstantní hodnotou modálního poměrného útlumu 5 %. Oprávněně lze očekávat, že model korektně postihne základní dynamické vlastnosti vlastní konstrukce.

Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitů konstrukce

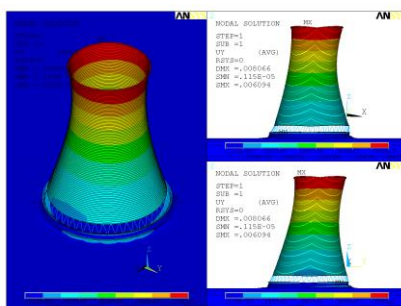
Výpočet s použitím Lanczosovy metody bylo pro variantu modelu A stanoven 1000 (pro variantu B 1000) vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů. Základní vlastní frekvence stanovená pro výpočtový model A je $f_1 = 0,9412$ Hz, hodnota $f_2 = 0,9412$ Hz. U výpočtového modelu B je $f_1 = 0,7836$ Hz a $f_2 = 0,7836$ Hz.

Seizmická odezva konstrukce

Odezva konstrukce na seizmický pohyb podloží popsaný typickými podkladovými akcelerogramy $a_g(t)$ byla stanovena přímou integrací pohybových rovnic. Pro soubor 1400 volených časových kroků byla získána pole posunutí (viz obr. 11) a napětí. V konečné fázi byly stanoveny obálky extrémů odezвовých veličin. Při výpočtu polí extrémů odezвовých veličin s použitím spekter odezvy $S_d(f)$ (viz obr. 12) bylo pro kombinaci modálních odezev použito pravidlo CQC.



Obr.11 Posunutí u_y v čase 7,47 s.



Obr.12 Posunutí u_y – řešení spektry odezvy.

Výsledky řešení dílčí úlohy projektu

Byly zpracovány zásady a postupy pro vytváření konečněprvkových výpočtových modelů souboru pěti vybraných typických stavebních konstrukcí s podloží. Pro tyto případy byly analyzovány vhodné způsoby modelování podloží s použitím systému náhradních diskretních pružin, náhradního pružného plošného uložení, modelu nehmotného pružného bloku podloží a modelu hmotného pružného bloku podloží.

Kvalitativně byly posouzeny vlivy způsobů modelování podloží na charakter spekter vlastních frekvencí (poloha spektra, hustota frekvencí) a příslušných vlastních tvarů kmitů.

Vzhledem k časové náročnosti výpočtů byly odezvy výpočtových modelů souboru pěti vybraných typických stavebních konstrukcí podrobněji analyzovány pouze pro případy tuhého podloží a podloží modelovaného jako nehmotný pružný blok. Dynamická interakce konstrukce s podložím nebyla uvažována. Bylo ukázáno na zásadní vliv poddajnosti základu na spektra vlastních frekvencí konstrukce.

Tab.6 Výsledky – výpočtový model B.

Posunutí	Seizmická odezva na buzení akcelerogramy		Seizmická odezva na buzení spektry odezvy
	Maximum odezvy [m]	Minimum odezvy [m]	Maximum odezvy pom. útlum 5% [m]
u_x	+0,003518	-0,004019	0,004613
u_y	+0,005153	-0,005398	0,006094
u_z	+0,001890	-0,001894	0,002612

Byly provedeny a vyhodnoceny srovnávací seizmické analýzy pro daný soubor konstrukcí pro případy seizmického pohybu bloku podloží popsaného pro jeho hranice s použitím typických podkladových akcelerogramů a spekter odezvy. Získané poznatky z výpočtů odezev v přemístěních ukazují – v souladu s obecnými poznatky – vyhovující shodu výsledků řešení dle obou výpočtových postupů. Srovnávání výsledků výpočtů odezev v napětích bylo problematické, neboť v konstrukcích jsou vesměs řádové rozdíly mezi průměrnou, velmi nízkou úrovní napětí a ostře omezenými, úzce lokálními extrémními napětími silně závislými na čase se zřetelem jak na velikost, tak polohu.

Byly provedeny a vyhodnoceny srovnávací seizmické analýzy pro daný soubor konstrukcí s použitím výpočtových modelů s tuhým a poddajným blokem podloží. Srovnání odezev bylo provedeno pro případy seizmického pohybu hranic modelovaného bloku podloží popsaného s použitím typických podkladových akcelerogramů i spekter odezvy. Získané poznatky z výpočtů odezev v přemístěních ukazují na zásadně podstatné rozdíly v úrovních odezev stanovených s použitím obou typů výpočtových modelů. Souvisí to s velkým relativním posunem spekter vlastních frekvencí modelů s tuhým a poddajným podložím a s charakterem typických spekter odezvy.

Byly provedeny a vyhodnoceny výpočty podlažních spekter odezvy ve zrychleních pro vybrané výškové úrovně konstrukcí s použitím výpočtových modelů s tuhým a poddajným blokem podloží (Salajka et al., 2006). Seizmický pohyb hranic modelovaného bloku podloží byl popsán s použitím typických podkladových akcelerogramů. Prokázaly se zásadně podstatné rozdíly v podlažních spektrech odezvy stanovených s použitím obou typů výpočtových modelů. Rozdíly jsou značné jak ve tvaru spekter, tak ve velikostech spektrálních zrychlení. Souvisí to především s velkým relativním posunem spekter vlastních frekvencí modelů s tuhým a poddajným podložím a s charakterem typických spekter odezvy.

Závěr

Výpočtové modely typických konstrukcí s podložím, vytvořené metodou konečných prvků poskytují poznatky použitelné při vytváření výpočtových modelů nově projektovaných staveb v zájmové oblasti Karviná. Provedené výpočty odezev přispěly k prohloubení poznatků o chování vybraných typů technologických konstrukcí a staveb vystavených nestacionárnímu dynamickému zatížení indukovanou seizmicitou. Získané poznatky lze aplikovat pro řešení analogických úloh u jiných typů konstrukcí.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Výzkumného záměru MSM0021630519 Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce.

Literatura

- [1] Kárník, V., Michal, V. & Molnár, A. (1957): Erdbebenkatalog der ČSSR. Geofyzikální sborník, No. 61–71, Nakladatelství ČSAV, Praha, str. 411–598.
- [2] Procházková, D. & Šimůnek, P. (1999): Regional Earthquake Catalogue and Focal Regions in Central Europe. ACTA MONTANA IRSM AS CR, Ser. A, No. 13(111), str. 5–82.

- [3] Klíma, K., Ruprechtová, L. & Špičák, A. (1986): Důlní otřes v OKR ze dne 27. 4.1983 (Rock burst in OKR from April 27, 1983 – in Czech). In: Počítačové spracovanie údajov československej seismickej siete, GfÚ Bratislava, str. 35–48.
- [4] Kaláb, Z. & Knejzlík, J. (2001): Zesílení amplitudy seismických vln v pokryvných útvech karvinské části OKR. Sborník konference Mineral Raw Materials and Mining Activity of the 21st Century, VŠB – Technical university of Ostrava, Czech Republic, ISBN 80-7078-854-2, 157–164.
- [5] Kaláb, Z. & Knejzlík, J. (2002): Systematic measurement and preliminary evaluation of seismic vibrations evoked by mining induced seismicity in Karviná area. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., Warszawa, M-24(340), ISSN-0138-015X, 95–103.
- [6] Kaláb, Z. (2004): Soubor reálných seizmologických dat – „důlně indukovaný jev z 11. 3. 2004“ = “mining induced seismic event“. E-mail z 19. 5. 2004.
- [7] Kaláb, Z. et al. (2006): Experimentální měření seismických účinků technické seizmicity na povrchové objekty. Zpráva ÚGN v rámci projektu GAČR 105/04/1424, ÚGN AVČR, Ostrava.
- [8] ČSN 73 0031 – Spolehlivost stavebních konstrukcí a základových půd. Základní ustanovení pro výpočet. Structural reliability. Basic requirements for design, 1988.
- [9] ČSN 73 0040 – Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva. Loads of technical structures by technical seismicity.
- [10] Salajka, V., Kanický, V., Smutný, J. & Hradil, P. (2006): Seismická odezva konstrukcí. Výzkumná zpráva v rámci projektu GAČR 105/04/1424 Odezva technologických konstrukcí a staveb na zatížení technickou seizmicitou, ÚSM, FAST, VUT v Brně, Brno.